

報道機関 各位

東北大学 多元物質科学研究所
株式会社サイオクス

一億個に一つの不純物も見逃さない！
-窒化ガリウム結晶中の炭素不純物を高感度・非破壊・非接触検出-

【発表のポイント】

- 窒化ガリウム結晶中の炭素不純物を、非破壊・非接触にて検出する手法を確立
- 一億個に一つ以下のごく微量な不純物濃度でも検出可能
- 高耐圧トランジスタや発光ダイオードの高性能化に寄与

【概要】

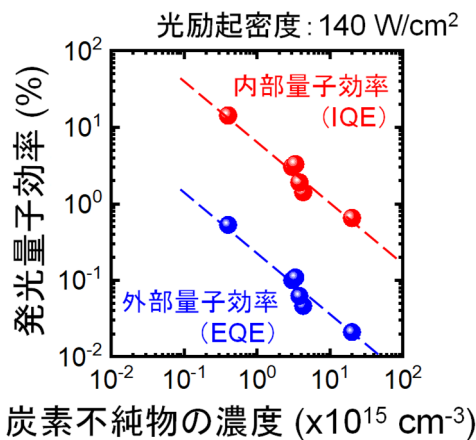
東北大学多元物質科学研究所 小島 一信 准教授、秩父 重英 教授は、株式会社サイオクス 堀切 文正氏、成田 好伸氏、吉田 丈洋氏、藤倉 序章氏と協力し、全方位フォトルミネセンス(ODPL)法^{*1}を用いて、窒化ガリウム結晶における微量な炭素不純物の検出に成功しました。

持続可能な社会を実現するためには、限りあるエネルギー資源の高効率な利活用技術の開発が必要です。例えば、鉄道や電気自動車のような電力を強い動力に変換して利用する応用では、高耐圧かつ低損失にて電流の整流や電圧変換を行うダイオードやトランジスタといった電子デバイスが重要です。また、照明や通信、太陽光発電などの分野においては、電気エネルギーと光エネルギーとを相互に変換する発光ダイオード(LED)や半導体レーザー^{*2}、太陽電池といった光デバイスの高効率化が不可欠です。これら半導体デバイスは、用途に応じて様々な材料を用いて製造されますが、なかでも窒化ガリウム(GaN)は、高性能な電子デバイスや光デバイスに適する材料の一つとして注目され、国内外におけるGaNデバイスの開発競争が激化しています。

GaNに基づく高耐圧トランジスタや高出力LEDの性能を支配する要因の一つに、炭素不純物が挙げられます。炭素は微量でもデバイスの性能を低下させるため、これを高感度に検出する必要があります。しかし、半導体における不純物計測技術は、一般的に破壊検査、もしくは試料に対して電極を形成する必要があるなどの制限がありました。そこで小島准教授らは、半導体結晶の高精度な発光効率^{*3}計測技術(全方位フォトルミネセンス法)を応用することにより、GaNにおける炭素不純物の高感度かつ非

破壊・非接触検出手法を確立しました。またこの結果を用いて、サイオクス社が開発した2. 2億分の1以下の濃度でしか炭素を含まない超高純度なGa_N結晶であっても、炭素濃度を定量的かつ非破壊に測定可能である事を実証しました。

本研究の一部は、文科省の「人・環境と物質をつなぐイノベーション創出ダイナミック・アライアンス」および科研費若手研究(A)、挑戦的研究(萌芽)、新学術領域研究「特異構造の結晶科学」の助成を受けています。成果は応用物理学会と日本物理学会との協同内部組織である物理系学術誌刊行センター(PCPAP)の科学誌Applied Physics Express誌にて12月4日にオンライン公開されました。



【参考画像1】Ga_Nにおける炭素不純物とバンド端近傍の発光量子効率の関係。

【問い合わせ先】

(研究に関すること)

東北大学多元物質科学研究所

担当: 准教授 小島一信

教授 秩父重英

電話: 022-217-5363

E-mail: kkojima@tohoku.ac.jp

(報道に関すること)

東北大学多元物質科学研究所 広報情報室

電話: 022-217-5198

E-mail: press.tagen@grp.tohoku.ac.jp

【詳細な説明】

1. 背景

価値観の多様化や経済格差の鮮明化など、先を見通すことが困難になりつつある現代において、持続可能な社会を実現して安心・安全な生活環境を構築することは、多くの人々が願うところであると考えられます。このためには、限りあるエネルギー資源の高効率な利活用技術の開発が一つの方策と言えます。例えば、鉄道や電気自動車のような電力を強い動力に変換して利用する社会インフラ応用では、高耐圧かつ低損失にて電流の整流や電圧変換を行うダイオードやトランジスタといった電子デバイスが重要です。また、照明や通信、太陽光発電などの光応用分野においては、電気エネルギーを光エネルギーに変換するLEDや半導体レーザー、また逆に、光エネルギーを電気エネルギーに変換する太陽電池のような光デバイスの高効率化が不可欠です。

これら半導体デバイスは、用途に応じて様々な材料を用いて製造されますが、なかでも窒化ガリウム(GaN)は、高性能な電子デバイスや光デバイスに適する材料の一つとして注目され、国内外における各種デバイスの開発競争が激化しています。

GaNに基づく高耐圧トランジスタや高出力LEDの性能を支配する要因の一つに、炭素不純物が挙げられます。炭素不純物は、本来窒素原子が存在する位置に入り込むことで特有のエネルギー準位を形成し、光デバイスの発光効率を低下させます。また、結晶に強い電界が印加されると、このような準位は電子の発生源として働くため、トランジスタがOFFの状態でも電流が流れてしまう「電流リーク」が発生します。これらの性能低下は炭素不純物の濃度が低くても生じるため、炭素の高感度な検出手法が望まれています。

そこで小島准教授らは、これまで培ってきた半導体結晶の高精度な発光効率計測法である全方位フォトルミネセンス(Omnidirectional photoluminescence: ODPL)法を応用することにより、積分球^{*4}を核とする分光技術^{*5}を駆使した、GaNにおける炭素不純物の高速・高感度検出手法を確立しました。本研究成果は、高い検出感度を持ち、かつ光を試料に照射する方法であるため非破壊・非接触、さらには検査時間を大幅に短縮する評価技術を提供するものです。

2. 研究手法と成果

GaNは直接遷移型半導体^{*6}と呼ばれ、外部から励起^{*7}を受けると特有の光を放出します(例えば、GaNにInN^{*8}を混ぜたInGaNは青色LEDの発光層に利用されています)。この時、炭素不純物の少ない結晶ほど強く発光するため、発光量もしくは発光効率を指標とすることによって炭素不純物の濃度定量が可能となります。光計測は一般に瞬時かつ感度が高いという利点がありますが、一方で計測者の技量によってその強度が簡単に揺らぐため、再現性に乏しいことが知られています。このため小島准教授らは、積分球と呼ばれる装置内に試料を配置して、結晶から放出された光を全方位に渡って集めることで発光量や効率を絶対測定^{*9}する方法に着目し、評価技術の改善に取り組んできました(ODPL法)。

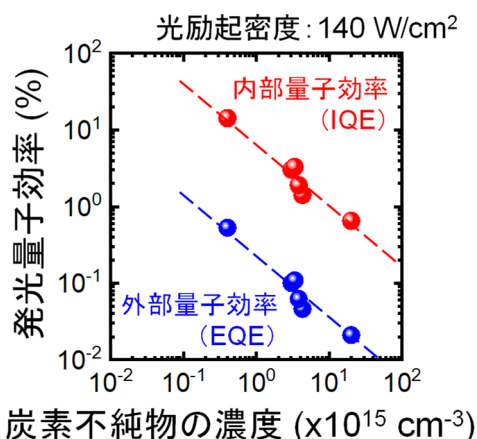


図2 GaNにおける炭素不純物とバンド端近傍の発光量子効率の関係。

小島准教授らは、炭素濃度を意図的に変化させた複数のGaN結晶を準備して、それぞれの発光量子効率をODPL法にて計測しました。その結果、図2のように炭素不純物の濃度に対応して、発光量子効率がほぼ線形に変化することを見出しました。さらに、一立方センチメートル当たりの炭素不純物の数が 4.0×10^{14} 個 ($4.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$)を下回るような低濃度領域においても線形性があることが分かりました。これは、GaN結晶の原子密度が(ガリウム原子と窒素原子を合わせた総数)が約 $8.8 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ であるため、およそ2.2億個 (2.2×10^8 個)に1個という、極めて微量の炭素原子が不純物としてまぎれていても検出ができることを意味します。

本研究成果は、試料の破壊や電極形成などの複雑な工程を必要とせず、試料に光を当てるだけで微量の炭素濃度が簡便に定量できることを示すものです。また、測定時間も従来手法と比べて極めて短いため、大きなGaN結晶全面の不純物分布の測定にも活用できると期待できます。

3. 今後の展望

本研究で開発した計測法は、直接遷移型半導体であれば無機材料だけでなく有機材料にも直ちに適用が可能です。また、不純物ごとに特有の発光色を呈することを利用して、炭素だけでなく、他の不純物元素も含めた不純物の同定についても挑戦していきます。

【論文情報】

タイトル: Roles of carbon impurities and intrinsic nonradiative recombination centers on the carrier recombination processes of GaN crystals

著者名: Kazunobu Kojima, Fumimasa Horikiri, Yoshinobu Narita, Takehiro Yoshida, Hajime Fujikura, and Shigefusa F. Chichibu

雑誌名: Applied Physics Express

DOI: 10.7567/1882-0786/ab5adc

【用語解説】

*1. 全方位フォトルミネセンス(ODPL)法

図 2 にて示すような、積分球を使った分光法の一つ。基礎吸収端エネルギー以上の光の放出方向が決まっていることを利用し、結晶の発光効率を再現性良く測定できる。

*2. 半導体レーザー

光通信やCD・DVDなどの光メディアの情報読み込み・書き込みなどに利用される、指向性の高いレーザー光を放出する半導体光デバイスのこと。

*3. 発光効率

対象となる発光材料に(本研究では励起レーザーによって)入力したエネルギーのうち、発光に利用される割合のこと。

*4. 積分球

内壁が硫酸バリウムやスペクトラロンといった拡散反射率の極めて高い(つまり、真っ白な)材料にて覆われた球状の装置。硫酸バリウムは、胃のレントゲンで造影剤としても用いられる。

*5. 分光技術

計測対象となる光をその成分(波長もしくはエネルギー)ごとに分析する技術。

*6. 直接遷移型半導体

光を強く放出し、かつ、基礎吸収端エネルギーよりも大きなエネルギーの光を強く吸収する性質を持つ半導体のこと。

*7. 励起

対象となる材料を電気エネルギーや光エネルギーを用いて刺激し、活性な状態にすること。励起された直接遷移型半導体は、余剰なエネルギーを光として放出(発光現象)し、励起を受ける前の状態に戻ることが多い。

*8. InN

窒化インジウムの略。

*9. 絶対計測

標準試料との比較無しに、物理量を計測すること。